



Kan ny teknik ge mindre elanvändning och mera dagsljus i grisstallar?

- del 2, simulering av dagsljus från ljustunnlar

Can new technology reduce use of electricity and improve daylight in pig houses?

– part 2, daylight simulation of light pipes

**Hans von Wachenfelt, Alejandro Pacheco Diéguez', Niko Gentile,
Knut-Håkan Jeppsson, Marie-Claude Dubois**

Institutionen för biosystem och teknologi
Department of Biosystems and Technology

Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Rapport 2015:18
ISBN 978-91-576-8908-5
Alnarp 2015

© 2015. Hans von Wachenfelt
Omslagsbild: Hans von Wachenfelt

FÖRORD

Mot bakgrund av den stora besparingspotentialen är det mycket angeläget att öka kunskapen om hur man erhåller energieffektiv belysning i jordbrukets driftsbyggnader men även i byggnader för humant bruk samt att bättre utnyttja dagsljuset genom ny teknik.

Det övergripande syftet var att reducera mängden elenergi för belysningsändamål i lantbrukets driftbyggnader. Detta gjordes genom att undersöka hur mycket elenergi som gick att ersätta med dagsljus samt hur djurens ljusmiljö påverkades av detta. Projektets mål var att utveckla system som med hjälp av modern teknik utnyttjar dagsljus till att skapa en bättre ljusmiljö vilken kräver mindre energi samt att ta fram underlag för datorsimulering och projektering av energieffektiv belysning där bl.a. denna teknik ingår.

Studien har finansierats av Energimyndigheten, SLO-fonden, Region Skånes miljöfond. Projektets experimentella del har genomförts tillsammans med institutionen för Energi- och Byggnadsdesign, Lunds Universitet på LBT's försöksgård i Odarslöv och har sammanställts av Hans von Wachenfelt vid Biosystem och Teknologi (BT), Sveriges lantbruksuniversitet, Alnarp.

Projektgruppen har bestått av Marie-Claude Dubois, Niko Gentile, samt Alejandro Pacheco Diéguez, Vaia Vakouli från institutionen för Energi- och Byggnadsdesign, Lunds Universitet och Knut-Håkan Jeppsson, och Hans von Wachenfelt från Biosystem och Teknologi, Sveriges lantbruksuniversitet, Alnarp.

Vi vill uttrycka vårt stora tack till Energimyndigheten, SLO fonden och Region Skånes Miljöfond för ekonomiskt stöd till projektet. Vi vill också tacka Mats Olsson och Thomas Nilsson för hjälp med att utföra våra mätningar, samt Jan-Erik Englund, SLU Alnarp för hjälp med statistisk bearbetning av datamaterialet.

Alnarp i juni 2015
Linda Tufvesson
Prefekt

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	2
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	3
SAMMANFATTNING	4
SUMMARY	5
FÖRKLARINGAR	7
1 INTRODUKTION	8
1.1 Bakgrund	8
1.2 Litteratur	8
1.3 Syfte och motivering	9
2 MATERIAL OCH METODER	10
2.1 Försöksstallar	10
2.2 Ljustunnlar	12
2.3 Belysning i stallarna	15
2.4 Mätsystem för ljus och belysningsel i stallar	15
2.5 Val av simuleringsmetod	16
2.6 Beskrivning av simuleringsmetoden	17
2.7 Felkällor	20
2.7 Parametrisk studie	22
3 RESULTAT	24
3.1 Utvärdering av simuleringsmetoden	24
3.2 Parametrisk studie	26
4 DISKUSSION	29
4.1 Variationen i mätvärden	29
4.2 Överensstämmelse mellan uppmätt och simulerade värden	30
4.3 Parametrisk studie	31
4.4 Förslag till förbättrad ljustunnelsimulering	32
6 REFERENSER	34
APPENDIX 1.	36

SAMMANFATTNING

Ljustunnlar erbjuder ett passivt sätt att erhålla dagsljus i breda byggnader för djurproduktion. Emellertid är ljustunnlar komplicerade optiska system och det saknas möjlighet att på förhand ange deras prestanda, vilket är ett hinder för en mer allmän användning av dem. Denna studie utvärderar ett simuleringsverktyg samt nyckelparametrar vid ljustunnelberäkning för att förbättra möjligheten till att på förhand ange deras prestanda samt att få fram riktlinjer för projektering av ljustunnlar.

Dagsljus mättes i två identiska grisstallar, utrustade med två ljustunnelsystem, Solatube® and Velux® i vardera stallen, med tre kontinuerligt mätande ljussensorer i varje stall och en utomhusplacerad sensor under 2013 och 2014. Ett simuleringsverktyg, TracePro, användes för simulering av dagsljus och ljustunnelparametrar.

Simuleringsresultaten vid molnigt väder visade en skillnad mellan simulerade och uppmätta värden lägre än 30 % hos de undersökta fallen. Vid klart väder var skillnaderna högre, endast 67 % av de undersökta tillfällena hade en skillnad som var lägre än 30 % mellan simulerade och uppmätta värden. Den högre skillnaden vid klart väder berodde på överskattning av solljus och avsaknad av en avancerad och detaljerad optisk karaktärisering av Solatubes kollektorkupol.

En differens under 30 % mellan simulerade och uppmätta värden med goda möjligheter att sänka dessa ytterligare är i dessa sammanhang ett gott resultat. I studien finns förslag på hur simuleringstekniken kan vidareutvecklas med förbättrat resultat.

Resultaten från den parametriska studien visade att ljustunnlar presterar bättre under sommartid, i soligare klimat, vid lägre latitud med högre solhöjd än under vinter och molniga klimatförhållanden vid högre latituder. Metoder för att förbättra ljusöverföringsfaktorn (effektivitetstal för ljustunneln) för låga solhöjder som i Skandinavien är: öka bredd-längd förhållandet hos ljustunneln, förbättra ljustunnelns speglande reflektans, att böja/luta kollektor och tunneln mot söder och använda optiskt omriktningssystem i kollektorn.

Nyckelord: ljustunnel, dagsljus simulering, TracePro, energibesparing, elektriskt ljus.

SUMMARY

Light pipes offer a passive way to bring daylight to rear spaces in deep animal buildings. Light pipes are complex optical systems and the lack of performance predictability methods hinders their widespread use. This paper evaluates a simulation tool and key light pipe design parameters to gain performance predictability and to provide design guidelines.

Daylight was measured in two identical pig stables, fitted with two light pipe systems, Solatube® and Velux®, with three continuously measuring sensors in each stable and an outdoor sensor during 2013 and 2014. A forward raytracing tool, TracePro, was used for illuminance and parametric simulation.

The simulation results for overcast skies presented a discrepancies between the simulated and average measurements below 30% in 100% of the cases. The discrepancies of clear skies were higher: below 30% discrepancy in 67% of the cases. The higher discrepancies with clear skies were due to the overestimation of sunlight and the absence of an advanced and detailed optical characterization for the Solatube collector dome.

A discrepancy of below 30% between simulated and measured values with the ability of further reduction is to be considered as a good result. In the study there are suggestions on how the simulation technique can be further developed and improved.

The parametric results showed that light pipes perform better during summer time, in sunny climates, at low to mid latitudes with higher solar altitudes than during winter and in cloudy climates at high latitudes. Methods to improve the light transmission factor (light pipe efficiency) for low solar altitudes like in Scandinavia are: bending or tilting the pipe, increasing the aspect ratio, improving the pipe specular reflectance, tilting the collector to the south and using an optical redirection system in the collector.

Keywords: light pipe, daylight simulation, forward ray-tracing, energy saving, electric lighting, stables.

FÖRKLARINGAR

AAD	Absoluta medelavvikelsen, ett statistiskt värde som används för att uttrycka hur en datamängd skiljer sig från dess medelvärde.
Absorption av ljus	Optisk egenskap hos yta som uttrycker bråkdelen av infallande ljus som absorberas av ett material.
Bredd-längd förhållande BSDF	Avser diametern hos tunneln dividerad med dess totala längd. 'Bi-directional scattering distribution function' är en avancerad och detaljerad optisk karaktärisering av en yta.
Diffus ljus reflektans GHI	Andel av reflektansen som är diffus, ej speglande. Total global ljusinstrålning utomhus uppmätt från en horisontell yta som pekar uppåt i en omgivning utan hinder.
Goniofotometri	Mätteknik som mäter vinkelfördelningen av diffust ljus – antingen vidarebefordrat eller reflekterat – som en funktion av infallande vinkel.
HDR bild	'High dynamic range' (HDR, som ögat uppfattar omgivningen) är ett bildalternativ till generella ljusfördelningsmodeller för himmel vid simulering (Inanici, 2010).
Klar himmel index, Kt	Faktor som uttrycker andelen av himlen som är molntäckt vid en given plats och tidpunkt.
Klar himmel/väder, CL	Minst 7/8 av himmelen måste vara ej molntäckt och får ej täcka solen eller synas från insidan.
Lambertian reflektor Ljus reflektans	Lambertian reflektion är oftast använd som modell för diffus reflektion. Optisk egenskap hos en yta som uttrycker bråkdelen av infallande ljus som reflekteras från ytan.
Ljus refraktion	Riktningsförändring vid ljusöverföring som uppstår i gränsen mellan två media med olika ljusbrytningsindex.
Ljusförlust faktor, LLF	Andelen dagsljus som förloras i ljustunneln vid en given solplacering och himmel förhållande. Den uttrycks som mängden ljus som inte når utrymmet inomhus i förhållande till det totalt infallande ljuset på kollektorn.
Ljus överföringsfaktor, LTF	Anger procentandelen ljus som går genom en ljustunnel vid en given solplacering och himmel förhållande. Den uttrycks som proportionen dagsljus utstrålad från diffuser i förhållande till det totalt infallande ljuset på kollektorn.
Nedsmutsningsfaktor, SDF	Faktor använd för att ta hänsyn till nedsmutsningen av ljussensorerna från grisarna i stallmiljön.
Optiskt omriktningssystem, ORS	Innovativt system som böjer av ljuset för att koncentrera det där det mest behövs, sprida det utan bländning.
Spridda ljusstrålar	Slumpvis reflektion av ljusstrålar från deras raka bana då de sprider sig genom ett medium pga. oregelbundenheter i dess yta.
Speglande ljustunnel, MLP	Högre reflekterande tunnel, vanligtvis cylindrisk, använd i ljustunnlar för transport av dagsljus från kollektor till diffuser.
Speglande reflektans	Är spegellik reflektion av ljus från en yta, i vilken ljus från en enda infallsriktning reflekteras i en enda utfallsriktning.
Solhöjd	Vinkel som definierar solens position på himlen i förhållande till horisonten.
Strålsparning (Ray tracing)	En teknik för att skapa en bild genom att följa ljusets bana genom bildpunkterna i ett bildplan och simulera dess påverkan från sammanstötningar med virtuella föremål.
TracePro®	En framåtriktad strålsparningsmetod.

1 INTRODUCTION

1.1 Bakgrund

Ett sätt att minska behovet av elektrisk belysning är att till största möjliga del använda dagsljus. Ljustunnlar erbjuder en passiv möjlighet till att få in dagsljus i de inre delarna av breda djurstallar. En mer omfattande användning hindras av att ljustunnlar är komplicerade optiska system samt dess brist på förutsägbar prestanda. Följaktligen kan inte ljustunnlars förtjänster beräknas och tas i betraktande i utvärderingssystem för miljövänligt byggande. Rapporten utvärderar ett simuleringsprogram samt nyckelparametrar för ljustunnelplanering för att erhålla förutsägbar prestanda för ljustunnlar och att ge underlag för beräkningsanvisningar.

1.2 Litteratur

Ett av de mest uppenbara tillvägagångssätten att minska elförbrukning använd för belysningsändamål är att optimera utnyttjandet av dagsljus. Dagsljus användning hos människor har också visat sig öka innehavarnas sällskaplighet, välbefinnande, produktivitet och hälsa (Dehoff, 2002; Harteb Puleo & Leslie, 1991; Figueiro, 2002). Dagsljus förbättrar humör och vakenheten då den är direkt kopplad till människans dygnsrytm och har liknande effekt på många djurarter (Ashkenazy et al., 2009).

Belysningskraven för grisar är minst 40 lux under en tid om minst 8 timar per dag enligt EU direktiv (CEC, 2001). Grisar i stallar ska ha tillgång till fönster eller liknande dagsljusinsläpp enligt Jordbruksverket (SJV, 2014). Breda byggnader dominerar svensk djurproduktion, och i sådana har fönster dålig djupeffekt, dvs de har svårt att lysa upp de inre delarna av byggnaden med dagsljus. För växande grisar, slaktkyckling och värphöns, som behöver isolerade byggnader med innertak, skulle ljustunnlar kunna betyda ökad användning av naturligt dagsljus.

Ljustunnlar kan förse djupt liggande utrymmen i breda byggnader med dagsljus samt har ett naturliga ljusspektrum med dynamiska växlingar. Ljustunnlar har fördelen av att effektivt kunna fånga ljusstrålar från solen utan att ge förhöjd värme och bländande solfläckar.

Den största nackdelen är att ljustunnlarnas prestanda i hög grad påverkas av hur molnfri himmeln är, dvs att mycket mindre ljusnivåer erhålls vid molniga förhållanden (Zhang & Muneer, 2000; Mohelnikova, 2009). Ljustunnlar är därför bättre lämpade för klimat med ett överflöd av molnfria förhållanden (Nilsson, 2012), medan klimatet i Sverige har en hög andel molniga väderförhållanden. Proportionerna av direkt/diffus instrålning är i Sverige bara ca 1/1 (Kjellsson, 2002), vilket är ganska lågt i jämförelse med flesta andra länder.

En av de större tillverkarna av ljustunnlar, Solatube International, Inc., uppger att utrymmen som betjänas av ljustunnlar inte skall ha större avstånd till husets takyta än 9 meter. Deras användning är därför mycket lämplig för större envåningsbyggnader t.ex. industribyggnader eller djurstallar.

Metoden att beräkna ljusstrålarnas väg (strålsparning eller ray-tracing) har använts sedan 1600-talet av Albrecht Dürer, under 1960-talet för ballistiska beräkningar till datoranimationer och inom film för att skapa fotorealistiska bilder men också för att simulera global ljusinstrålning (Whitted, 1979). Strålsparning är faktiskt en simulering av ljusstrålar som skickas slumpvis ut i rymden för att kunna förutse ljusstyrkan eller framställa realistiska bilder.

Det fysiska sammanhanget behöver bestämmas genom en modell som specificerar geometrin samt de optiska egenskaperna hos ingående ytorna som: absorption, reflektion, refraktion, spridning och diffraktion (Kolås, 2013). Ljuskällorna i modellen behöver också definieras och karakteriseras. Lämpligheten och precisionen hos ljussimuleringsprogrammet att simulera komplexa dagsljussystem som ljusstunnlar genom strålsparning, jämfört med andra metoder, grundar sig på förmågan att samtidigt kunna hantera ett stort antal variabler, som: geografiskt olika platser och olika grad av molntäcke på himlen, diffuser- och kollektorgeometri, komplexa optiska egenskaper, tunnelkrökar, etc (Dutton & Shao, 2007; Kohler, 2010; Farrel, Norton, & Kennedy, 2004).

Strålsparning kan utföras antingen bakåt eller framåt. I bakåt strålsparning är ljusstrålarna avgivna från en slutpunkt eller från betraktelsepunkten istället för från ljuskällan. De spridda strålarna uppnår därmed ett begränsat antal studsar, vanligen 3 till 5 st, i hela modellen (Kolås, 2013). Om de träffar en ljuskälla, så kommer ljusbidraget från ljuskällan att adderas till betraktelsepunkten, vilket betyder att noggrannheten hos resultatet beror på mängden ljustrålar som går att spåra.

För att kunna simulera ljusstunnlar så behöver antalet ljusstudsar ökas väsentligt, vilket följdriktigt förlänger simuleringstiden. Dessutom är antalet strålar som träffar solen mycket låg vid baklänges ljussparning, vilket gör det svårt att simulera direkt solsken med denna teknik (Kolås, 2013; Mardaljevic, Heschong, & Lee, 2009). Från början övervägdes två olika tillvägagångssätt av bakåt strålsparning för att komma förbi problemet med direkt solljus. Bägge metoderna förkastades, den första på grund av för lång simuleringstid, den andra för att den var alltför komplicerad.

1.3 Syfte och motivering

Projektets övergripande mål var att kunna bestämma ljusstyrka och ljusspridning från dagsljus genom datasimulering. Det första syftet var att utvärdera erhållet dagsljus från två ljusstunnelsystem genom att använda ett simuleringsverktyg och jämföra de simulerade värdena med uppmätta dagsljusvärden för att erhålla förutsägbar prestanda för ljusstunnlar. Det andra syftet var att använda ett simuleringsverktyg för utvärdering av nyckelparameterar vid ljusstunnelberäkning för att få fram riktlinjer för projektering av ljusstunnlar.

Hypotesen var att ljusstyrka och ljusspridning från ett dagsljussystem kan erhållas samt att riktlinjer för projektering av ljusstunnlar kan tas fram baserat på användning av ett simuleringsverktyg.

2 MATERIAL OCH METODER

2.1 Försöksstallar

Två identiska stallar, belägna bredvid varandra, utrustades med fyra ljustunnlar var, på samma position i varje stall. Ljustunnlarna i stall 1 åt öster, Velux Sun Tunnel[®], hade en böj i anslutning till den platta kollektorn, medan ljustunnlarna i stall 2 åt väster, Solatube Brighten Up[®], var raka och hade en kollektorkupol, utrustad med en reflektor för att omdirigera lågt infallande ljusstrålar, figurer 1 & 2. Ljustunnlarna var installerade på ett sadeltak med nord-sydlig riktning och en lutning om 22°. I varje stall placerades två tunnlar på den södra takhalvan medan de andra två placerades på den norra.



a)



b)

Figur 1. Ljustunnelinsläpp via kupoler och fönster (a), ljusinsläpp (diffuser) i stallavdelning (b).

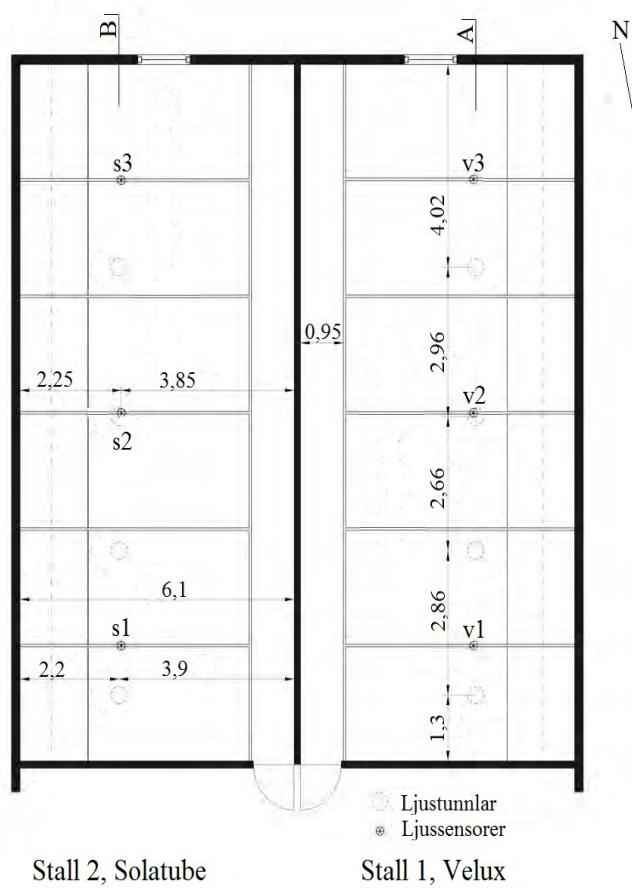
En planritning över stallarna visas i figur 3. Den invändiga måtten hos stallarna var 13,8 x 6,1 m med en innertakhöjd om 3,0 m. Varje stall hade sex slaktsvinsboxar längs en inspektionsgång med plats för 15 grisar i var box samt ett fönster för dagsljus mot norr. Figur 4 och 5 visar tvärsektioner av stallarna 1 och 2.

Tre ljussensorer placerades i varje stall, där sensorerna var placerade 1,8 m över golvytan utom räckhåll för grisarna. Sensorerna var monterade på en platta i slutet av en stolpe som i sin tur var fästad i en boxmellanvägg. Ljustunnlarna korsade ett vindsutrymme ovanför stallarna på väg upp mot yttertaket. Utrymmets höjd varierade mellan 1,65 m närmast fasaden till 4,7 m undernocken.

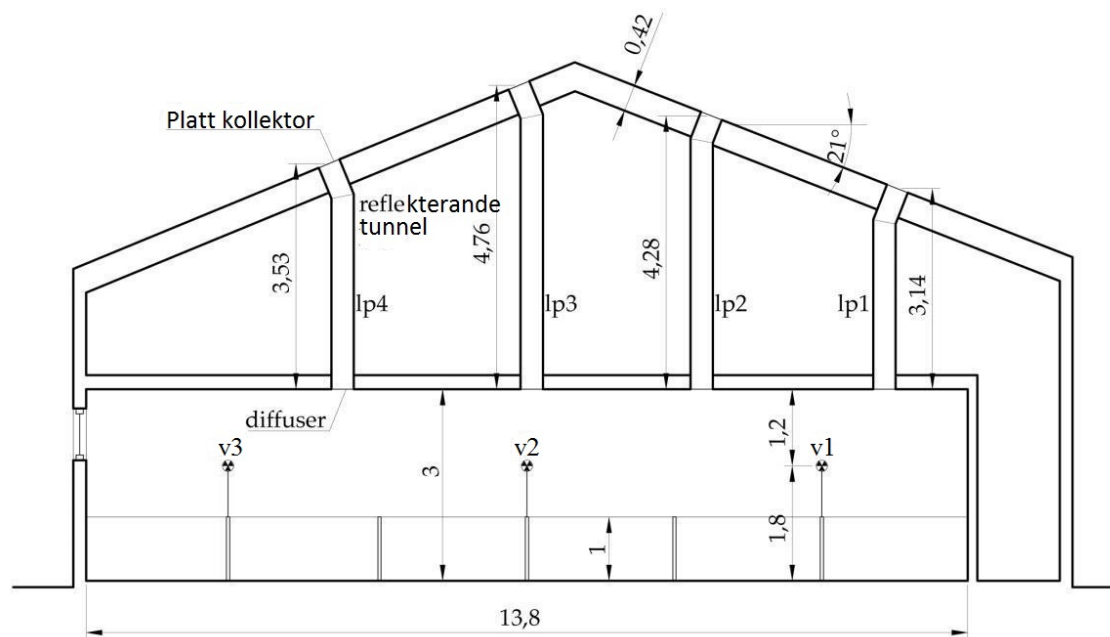
Stallarna fanns på Odarslövs försöksgård, strax norr om Lund (55°45' Norr, 13°15' öster). Klimatförhållanden under året är övervägande molniga. Solståndet mitt på dagen är 11° den 21 december och 58° den 21 juni.



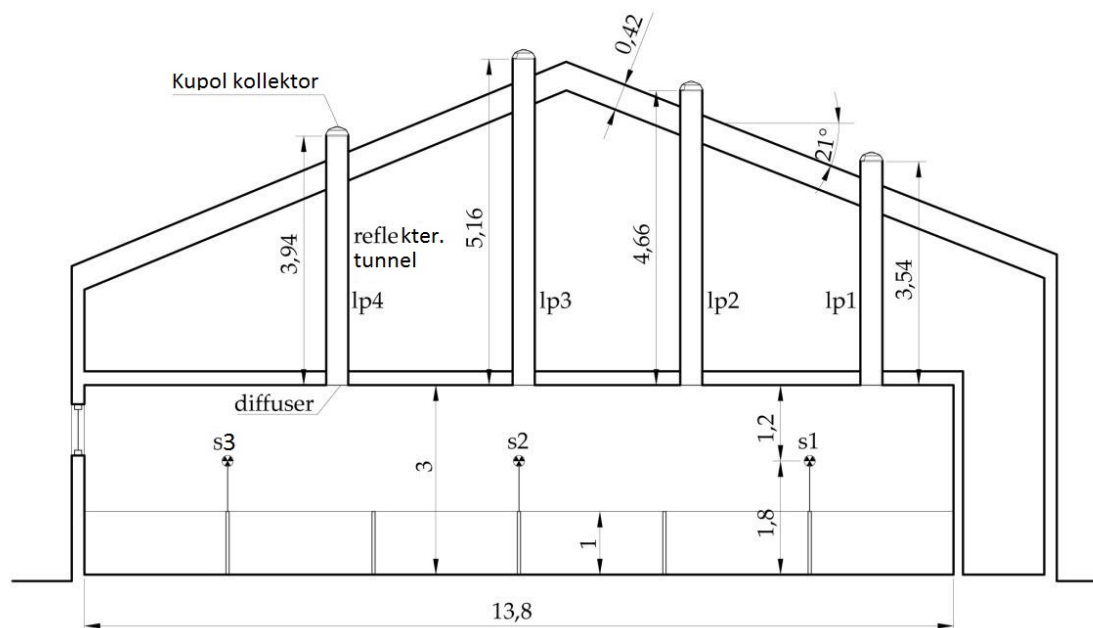
Figur 2. Odarslövs försöksstallarna från ovan.



Figur 3. Planritning över slaktsvinsstallarna på Odarslövs försöksgård. Sektionsritningarnas snitt är markerat med A respektive B.



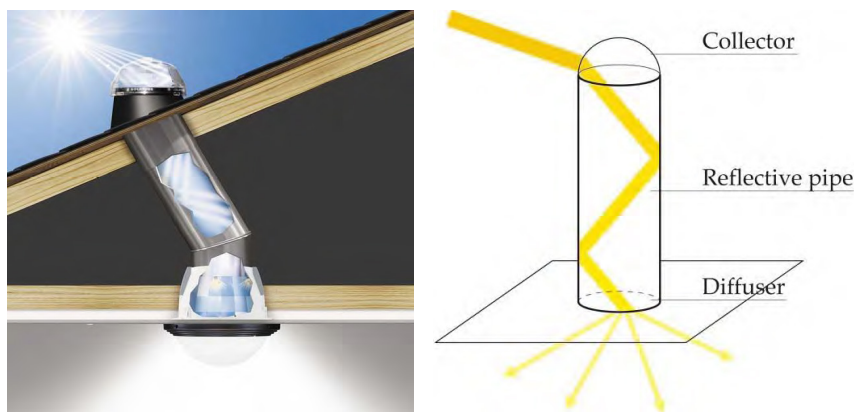
Figur 4. Sektion A (stall 1, Velux)



Figur 5. Sektion B (stall 2, Solatube)

2.2 Ljustunnlar

De ljustunnlar som använts på Odarslöv är Velux Sun Tunnel® and Solatube Brighten Up®. Ljustunnlarna består av tre huvudkomponenter: kollektorn, den reflekterande tunneln och diffusern, figur 6. Tabell 1 visar de optiska egenskaperna hos de båda ljustunneltyperna.



Figur 6. Skematisk presentation av Solatube ljusstunnel (källa: Solatube websida).

Tabell 1. Optiska egenskaper hos de undersökta ljusstunnelmodellerna.

Komponenter & optiska egenskaper	Velux Sun Tunnel® Fast krök, Ø 35 cm %	Solatube Brighten Up® 290 DS, Ø 35 cm %	Källa
Kollektor typ & ljusöverföring	Platt 87	Kupol 92	Data från tillverkande företag: Velux® och Solatube®
Ljusreflektans tunnel	98 (6 % diffus)	99 (fullt speglande)	
Ljusöverföring diffuser	81	92	
Ljusreflektans deflektor	-	99 (fullt speglande)	

2.2.1 Kollektor

Kollektorn är en transparent beståndsdel lokaliserad vid den yttre öppningen på tunneln. Dess huvudsyfte är att fånga in dagsljus och skydda ljusstunneln från påverkan av väder och nedsmutsning. Den är vanligtvis utförd av något starkt ljusgenomsläppligt material, och kan vara platt eller kupolformad. I det här fallet är ljusstunnlarna i stall 1 (Velux) försedda med en platt kollektor medan de i stall 2 har en kupolformad kollektor, [figur 7](#).

Den platta kollektorn hos Velux består av enkel klarglasruta fastsatt vid ljusstunnelns övre öppning. Den kupolformade kollektorn hos Solatube är formgjuten Fresnel-lins betående av variabla optiska prismor som kan rikta om ljusstrålarna vid låg solvinkel in i tunneln. Denna egenskap har visat sig höja ljuseffektiviteten hos ljusstunneln vid tillfällen då solen står lågt (Zhang et al., 2002; Lo Verso et al., 2011). Detta är en förtjänstfull egenskap för de Skandinaviska länderna. Emellertid dominerar molnigheten under vintern, då solen står som lägst, vilket kraftigt begränsar fördelen av att använda detta system. Förutom att optimera insamlingen av ljusstrålar brukar den här typen av kupolformade kollektorer begränsa ljusstrålar från sol vid högre solvinkel för att undvika visuellt obehag (bländning) av solfläckar. I det här fallet är så höga solvinklar obefintliga, vilket kan göra detta särdrag rätt ofördelaktigt, då det blockerar delar av den diffusa ljuset från himlen.

Solatubes kollektorkupol är utrustad med en ljusreflektor, vilken kan klassas som ett optiskt omriktningssystem (ORS). Det är en laserskuren spegel inuti själva kupolen som är orienterad mot ekvatorlinjen. Dess syfte är att omdirigera lågt infallande ljusstrålar in i ljusstunneln. Förmågan för ljus vid låga solvinklar (lägre än 60°) att tränga igenom är på så vis ytterligare förstärkt (Lo Verso et al., 2011; Edmonds et al., 1995), tabell 1.



Figur 7. Solatube kupolformade kollektor med reflektor (källa: Solatube websida).

Detta kan vara en fördel i södra Sverige där solvinkeln mitt på dagen varierar mellan 11 och 58°. Dock blockerar ljusreflektorn delvis genomträngningen av diffust ljus från norr. Detta är en kritisk detalj för skandinaviska förhållanden där diffus instrålning står för omkring 50 % av den totala årliga instrålningen (Kjellsson, 2002). Det kan tilläggas att den nordligaste av ljustunnlarna i stall 2 (lp4) inte försågs med ljusreflektor då direkt solljus blockeras av taketsnock under mesta tiden av året.

2.2.2 Reflekterande ljustunnel (RLT)

RLT är tunneln som transporterar dagsljus från kollektorn till diffusern. Dess design och optiska egenskaper är optimerade för att minimera ljusförluster. I det här fallet, har de båda undersökta ljustunnelmodellerna en cirkulär tvärsnitt, då detta är den vanligast förekommande formen på marknaden. Dock rekommenderar vissa studier rektangulär tvärsektion, vilket förbättrar systemets prestanda vid låga solvinklar (Swift, 2010).

Den ljusreflekterande egenskapen hos RLT, dvs. dess starkt speglande reflektans, är dess viktigaste (vanligen över 98 %) då de fungerar bäst vid solsken. En liten nedgång i reflektans har stor betydelse för kapaciteten på grund av det stora antalet ljusstudsar inom tunneln. Detta förklaras av att då reflektansen hos de omslutande ytorna är hög ökar det inbördes reflekterande ljuset i hög grad ytans ljusstyrka.

En annan viktig faktor för ljustunnlarnas kapacitet är dess bredd-längd förhållande. Denna bestämmer mängden ljusstudsar i ljustunneln. Det rekommenderade förhållandet är $< 1/10$ och enligt vissa författare bör det aldrig överstiga $1/20$ för att nå ett minsta ljusmängd (Mohelnikova, 2009). Bredd-längd förhållandet för de installerade ljustunnlarna var $1/9$ till $1/15$. Tvärsnittet bör aldrig understiga 200 mm för att undvika orimligt stora ljusförluster. I det här fallet hade båda systemen en diameter om 350 mm.

2.2.3 Diffuser

Ljustunneldiffusern är installerad i taket av de rum som ska lysas upp och har vanligen formen av en oval kupol eller en platt polykarbonatplatta. Tillsammans med solhöjden avgör diffusern ljusmängden och dess distribution från en ljustunnel (Mohelnikova, 2009).

Den utgående ljusdistributionen påverkas av form och beskaffenhet eller mönster hos diffusern. Platt diffuser ger en smallare ljusstråle medan en konvex form tillåter mer vidvinklat diffust ljus (Zhang, et al., 2002). Å andra sidan, är den totala ljusmängden från en platt diffuser ca 10-12% högre än från en kurvformad (Robertson et al., 2010).

En Fresnel diffuser är en tvåkomponents diffuser vars konstruktion ligger mittemellan de tidigare typerna. De är speciellt fördelaktiga vid klar himmel och har endast måttliga nackdelar för diffust infallande ljus. De är utrustade med ett diffust mittparti med en klar kantyta runt om mittpartiet (Kocifaj, 2009). Att belysa vertikala ytor kan förstärka uppfattningen av ljushet i ett utrymme. Diffusern hos ljusstunnlarna i grisstallarna är platta och prismaformade.

2.3 Belysning i stallarna

Varje stallavdelning hade tre takmonterade lysrörsarmaturer (2 x 36 W, T5 Malmbergs Alpha, Sverige). Dessa manövrerades av ett automatiskt skymningsrelä som höll belysningen tänd endast då dagsljuset var otillräckligt, dvs. om det understeg 40 lux mellan 0800 och 1600 (CEC, 2001; SJV 2014). Eftersom tröskelvärde var så lågt skulle en placering av reläets sensor inuti stallet ha genererat en kontinuerlig svängning mellan till- och frånslag. Därför placerades dessa sensorer på vindutrymmet ovanför stallarna, ett utrymme utan direkt ljusinstrålning. Reläets tröskelvärde ställdes in (potentiometer) genom att beräkna ljusförhållandet mellan sensorns placering och en representativ plats i stallet. Reläet hade en justerbar tidsfördröjning för att slå om, för att undvika ideliga omslag, och denna ställdes in på en minut.

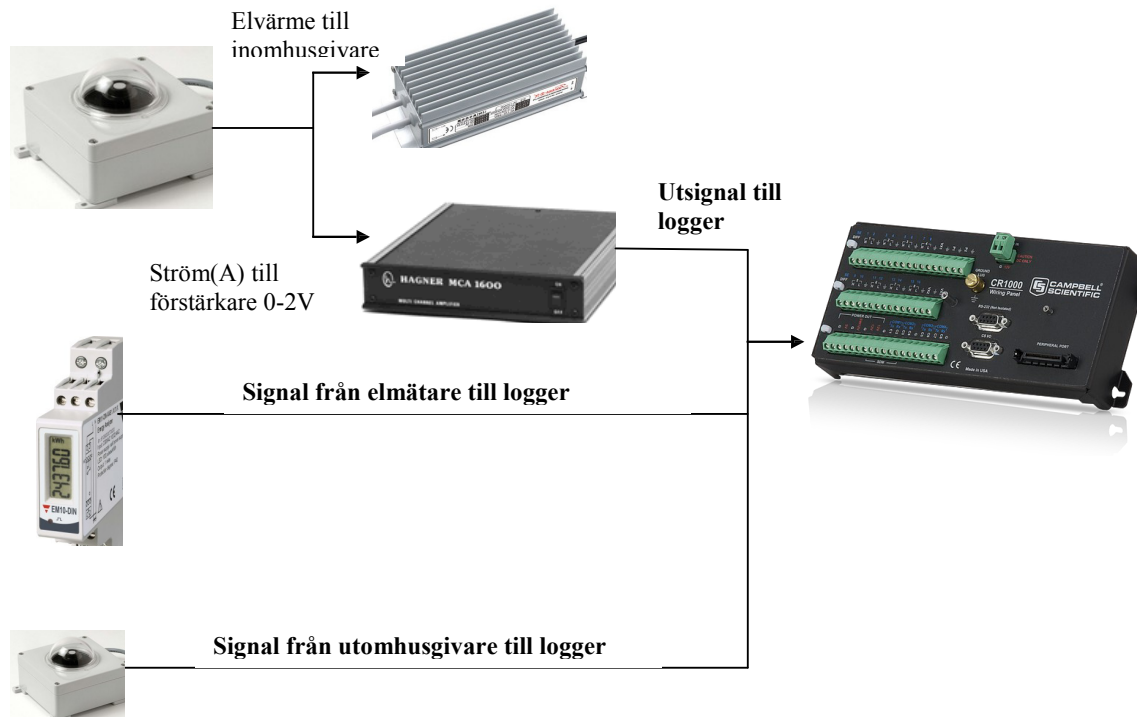
2.4 Mätssystem för ljus och belysningsel i stallar

Ett mätssystem bestående av inomhus och utomhussensorer och elmätare användes för att kontinuerligt mäta ljusstyrkan i stallavdelningarna och utomhus samt elkonsumtionen från belysningen (Gentile et al., 2012). Mätdata registrerades av en logger i ett närliggande utrymme intill stallarna, se figur 2 och 8. Ljussensorernas påverkan från stallfönstrens dagsljus var lika för bägge stallavdelningarna.

Mätssystemet bestod av tre ljussensorer som mätte horisontellt ljus invändigt i varje stall och en ljussensor för utomhus ljusinstrålning, figur 9. Ljussensorerna inomhus (Hagner SD2 Light Sensor, B. Hagner AB, Sweden) var placerade 1,8 m från golvet längs en centrumlinje genom grisboxarna med ett mätområde om 0-2 000 lux, figur 4 och 5. Utomhussensorn (Hagner ELV-841 Light Sensor, B. Hagner AB, Sweden) placerades i en omgivning utan hinder söder om stallarna med ett mätområde om 0 – 200 000 lux. För att kunna motstå miljön i stallarna utrustades sensorerna med vattentät, uppvärmt hölje för att undvika kondensbildning och frost på ytorna orsakat av låga temperaturer utomhus och i stallarna.

Samtliga sensorer hade kalibrerats av Hagner AB innan leverans och hade en angiven noggrannhet om $\pm 3\%$. Både inomhus- och utomhusmätarna genererade en utsignal i volt som skickades till loggern. Ett skymningsrelä (Turnus 771, Grässlin GmbH, Bundesstrasse 36, 78112 St. Georgen, Tyskland) reglerade till- och frånslag av belysningen då ljusstyrkan under- respektive överskred tröskelvärde om 40 lux. Elförbrukningen registrerades av en elmätare med en utsignal om 1000 pulser/kWh till loggern.

Dataloggern (CR 1000, Campbell Scientific Inc. Logan, Utah, USA) fick en signal från de olika sensorerna var 10 sekund, och dessa signaler användes för att beräkna ett periodiskt medelvärde var 6 minut och var timme.



Figur 8. Skiss över data insamlingsystemet.

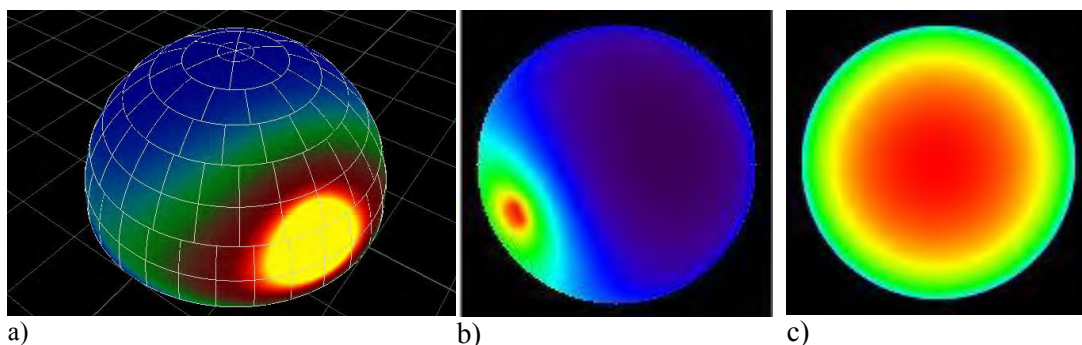


Figur 9. Hagner SD2, inomhussensor placerad 1,80 m över golvytan i stallen.

2.5 Val av simuleringsmetod

Framåt strålsparning valdes på grund av sin enkelhet, tillförlitlighet, förmåga att även hantera direkt solljus och dess förmåga att kunna simulera stora mängder ljusstudsar inom en rimlig simuleringsperiod. Framåt strålsparning skickar strålar från ljuskällan via ett antal studsar i den virtuella modellen för att fastställa ljusnivån i en punkt, figur 10a.

Vid varje sammanstötning med modellen kan strålarna bli utsatta för absorption, reflektion, refraktion (ljusbrytning), diffraktion (ljusböjning) and scatter (strålspridning). Programvaran håller kontroll på den optiska flödet förbundet med varje stråle då strålarna sprider sig i modellen (Lambda Research Corporation, 2014).



Figur 10-a) Exempel på punktindelning av himlen (Tragenza & Wilson, 2011). b) Ljusfördelningsmodeller vid klar och molnig himmel, (Igawa et al., 2004).

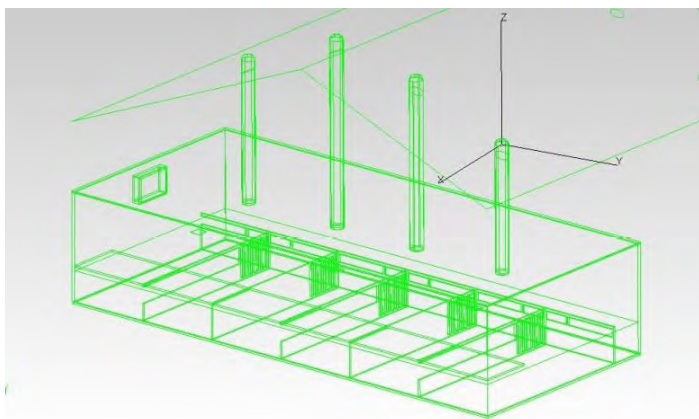
Det valda simuleringsprogrammet i studien var TracePro[®] Expert 7.4.1 Release (TracePro[®]), utrustad med en solliknande emulator som tillät simulering av både direkt solljus och diffust (indirekt) ljus från olika typer av förhållanden på himmeln, tex. olika grad av molnighet. Den solliknande emulatorns förmåga att simulera stora mängder ljusstudsar under rimlig simulerings tid, erhöles genom att endast simulera strålar som riktades mot öppningarna hos den virtuella modellen av byggnaden.

2.6 Beskrivning av simuleringsmetoden

2.6.1 Den virtuella modellen

Framåt strålsparning tillämpades genom tre steg: bygga den virtuella modellen, definiera ljuskällorna och definiera öppningarna hos den virtuella modellen och ljussensorerna. Den virtuella modellen innehöll ett byggnadsskal liknande försöksstallet, boxmellanväggar etc, se figur 11. Grisarnas utfodringssystem och ett antal rör som hängde i taket utelämnades i modellen. Detta kan medföra fel i simuleringsresultaten, men med tanke på storleken och positionen hos de utelämnade objekten med avseende på ljussensorerna torde felet vara försumbart. Den tredimensionella modellerna av stallarna utfördes genom programvaran Rhinoceros[®] och exporterades sedan till TracePro[®] genom en ACIS (*.sat) fil. Ljustunnlarna modellerades så noggrant som möjligt inklusive kollektorer, reflekterande ljustunnlar och diffuser.

Vid definiering av ljuskällorna specificerades de optiska egenskaperna hos modellens beståndsdelar i programvaran, för att ta hänsyn till ljusets interaktion med dessa delar. För ett komplicerade optiskt system som ORS, behövs en goniofotometrisk specification genom en 'bidirectional scattering distribution function' (BSDF) fil, vilket är en avancerad och detaljerad optisk karakterisering av en yta. Denna information tillhandahölls av tillverkarna av Velux diffuser och infördes i programvaran genom att BSDF filen omformades för användning i TracePro[®]. Resterande transperanta beståndsdelar hos ljustunnlarna definierades genom att använda den ljusmängd som absorberades eller vidarebefodrades från dem, se tabell 1.



Figur 11. TracePro® modell av ett grisstall.

Informationen som tillhandahölls av tillverkarna var tillräcklig för att karakterisera Velux platta kollektor. Men för Solatubes kollektorkupol var informationen otillräcklig för att på ett noggrant sätt återge dess interaktion med ljuset. Istället användes ett standardiserat ytmaterial från TracePro® programbibliotek för Solatubes diffuser då ingen BSDF fil fanns tillgänglig vid tidpunkten för simuleringarna.

Yt-reflektansen från de övriga byggnadsdelarna som ingick i modellen (väggar, tak, golv etc.) specificerades och samtliga byggnadsdelar i stallarna behandlades som Lambertian reflektorer, dvs. att de uppmätta värdena för reflektansen infördes i modellen som om de vore 100 % diffusa, se tabell 2. Detta är en vanlig förenkling och normalt medför detta inga betydelsefulla fel. De reflekterande ljusstunnlarna kräver dock en mer detaljerad karakterisering av andelen diffus och speglade reflektans.

Tabell 2. Uppmätt ljusreflektans hos stallytor. En matt vit skiva med känd reflektans och en ljusmätare (Hagner S4 Universal Photometer) användes för att mäta reflektansen hos de olika ytorna i stallarna enligt IEA (2001), (Jeppsson et al., 2014).

Stall ytor	Uppmätt ljusreflektans %
Boxmellänvägg (lägre del)	22
Boxmellänvägg (övre del)	30
Golv (utan strö)	14
Golv (med lite strö)	30
Golv (med mycket strö)	24
Golv (nytt stö)	32
Betonggolv	12
Betongspalt golv	9
Betonggolv utanför grisbox	19
Brun plywood vägg	40
Innertak (vit korrugerad stålplåt)	65

2.6.2 Definition av ljuskällorna

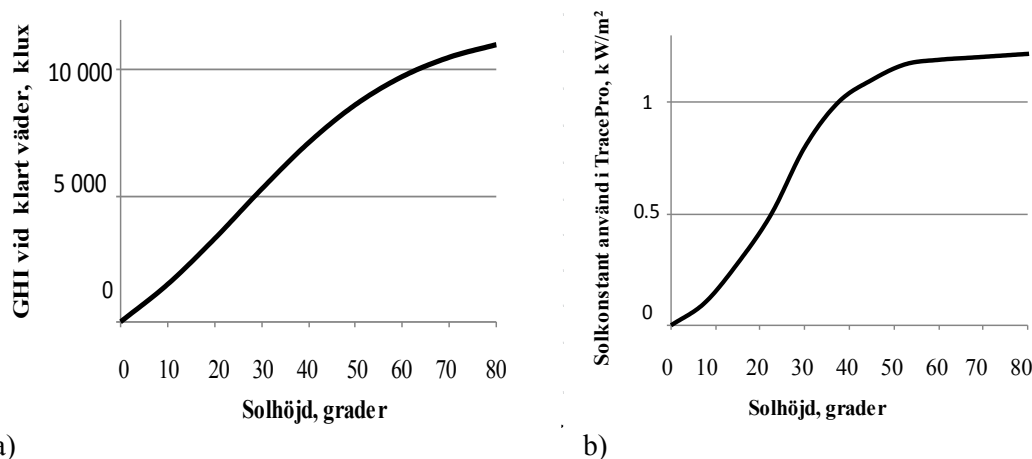
Den solliknande emulatorfunktionen hos Trace-Pro® användes för att simulera dagsljus från både himmeln och från solen. Uppgifter om latitud, longitud, datum, tid, tidszon,

kompassriktning och solhöjd behövdes för att specificera solens position och ljusfördelningen från himmeln i förhållande till modellen.

Ljusfördelningen från himmeln bestämdes genom att välja data från en katalog av fördefinierade ljusfördelningsmodeller, se figur 10b och c. I det här fallet användes ljusfördelningsmodeller vid klar och molnig himmel av Igawa et al. (2004), där upp mot 50 000-80 000 strålar användes i de olika simuleringarna för att uppnå tillräcklig mängd strålar för ett tillförlitligt resultat.

Modellen av solen definieras också av solkonstanten uttryckt i W/m^2 . Standardvärdet behöver anpassas för varje särskild plats med avseende på dess höjd över havet och solhöjd. Den globala ljusinstrålningen (GHI) vid kustnivå och aktuell solhöjd framgår av figur 12a. Lund är den närmast liggande staden till Odarslöv och Lund ligger 60 m över havet, vilket kan antas vara jämförbart med havsnivå. Ett solkonstantvärde infördes därför i TracePro[®] för en plats vid kustnivå och bestämdes på följande sätt.

Den globala ljusinstrålningen bestämdes genom simulering vid olika solhöjder vid klart väder i programmet. Solkonstanten justerades sedan för var solhöjd för att nå kravet för den globala instrålningen, se figur 12a. Det resulterande värdet för solkonstanten som infogas i TracePro[®] återfinns i figur 12b. Upp mot 10 000-30 000 strålar användes vid simuleringarna för att uppnå tillförlitligt resultat.



a) Figur 12-a) Den globala ljusinstrålningen vid klart väder som funktion av solhöjden vid havsnivå (Murdoch, 1985). b) TracePro[®] solkonstant som funktion av solhöjden.

2.6.3 Placering av öppningarna hos den virtuella modellen

Den solliknande emulatorfunktionen hos Trace-Pro[®] fodrar en detaljerad beskrivning av öppningar och sensorer hos den virtuella modellen. En öppning hos modellen är helt enkelt det område där ljusstrålarna tar sig in i ljustunneln i den framåtriktade strålsparningsprocessen, medan sensorn är den punkt i modellen där ljusinstrålningen mäts. Öppningarna i modellen är ytområden som används för att reducera mängden ljusstrålar från ljuskällan (sol eller himmel) mot modellen. Öppningarnas ytor mot vilka strålarna riktas är placerade över den simulerade byggnadens öppningar. Genom att endast slunga ut strålar mot öppningarna kan antalet simulerade ljusstrålar optimeras och simuleringstiden minskas.

Det är viktigt att öppningarnas placering och orientering är fastställd då detta kan dramatiskt påverka resultaten och äventyra dess noggrannhet. I det här fallet placerades

de individuella öppningarna över de utvändiga öppningarna hos de fyra ljusstunnlarna i vart stall. På detta sätt kunde ljusbidraget på ljussensorena från var och en av tunnlarerna betraktas var för sig.

Sensorerna framställdes som 300 x 300 mm horisontella kvadrater, med samma placering i den virtuella modellen som sensorerna haft i mätningarna i stallarna. Vid framåtriktad strålsparning bestäms ljusinstrålningen på en yta genom summering av samtliga bidrag från alla ljusstrålar som träffar ytan. Öppningarna hos den virtuella modellen bedömdes stor nog för att träffas av ett erforderligt antal ljusstrålar så att medelvärdet av dem kunde anses tillräckligt noggrant.

2.7 Felkällor

Detta avsnitt behandlar felkällor och hur mätvärdesavläsning och simuleringsresultat hanterades för att minimera dessa fel. Totalt tio särskilda tillfällen valdes ut för jämförelse mellan simulerade resultat med tidigare mätvärdesavläsning, av vilka fem svarade mot molniga förhållanden (OC) och sex motsvarade klart väder (CL) vilka inträffade mellan december 2013 och mars 2014, se tabell 3.

Tabell 3. Förteckning över de mättillfällen som valt ut för jämförelse simuleringsresultaten, där OC betyder molniga förhållanden, CL betyder klart väder och Kt är ett index för graden av klar himmel.

Namn ¹	Kt ²	Datum	Klockslag	Solhöjd
OC1	0.92	11-Feb-2014	14:12	-
OC2	1	19-Feb-2014	16:12	-
OC3	1	03-Feb-2014	15:00	-
OC4	1	21-Jan-2014	10:00	-
OC5	1	01-Jan-2014	12:00	-
CL1	0.14	04-Feb-2014	12:00	17.45°
CL2	0	10-Feb-2014	15:30	9.06°
CL3	0.01	10-Feb-2014	13:00	18.90°
CL4	0.03	25-Feb-2014	14:12	21.30°
CL5	0.03	25-Feb-2014	17:00	2.92°
CL6	0.01	12-Mar-2014	10:48	28.16°

¹⁾ OC = molniga förhållanden, CL = klart väder.

²⁾ Kt = index för graden av klar himmel.

Erhållna mätdata från mätsystemet var tillförlitligt, ändå förekom en hög variation hos ljussensorernas mätdata då de summerades till periodiskt medelvärde var 6 minut, speciellt vid molniga förhållanden. För att minska denna variation utfördes en medelvärdesberäkning av tre påföljande mätningar (6 min. periodiskt medelvärde) för varje tillfälle som valt ut för jämförelse simuleringsresultaten. Den absoluta medelvärdesavvikelsen (AAD) för mätvärdena beräknades för att få en uppskattning av variationen i ljusnivå hos de olika sensorerna vid olika molnighetsförhållanden. Detta värde uttrycktes i procent av medelvärdet av de tre mätningarna enligt följande formel:

$$AAD = \frac{\frac{\sum [X_n - m(X)]}{n} \times 100}{m(X)}$$

AAD = absoluta medelvärdesavvikelsen i procent,

X_n = varje mättillfälle,

$m(X)$ = medelvärde av varje mättillfälle,

n = antal mättillfällen ($n = 3$ i alla fall utom för OC1, där $n = 5$)

Under försökets gång fann man att mätsystemets sensorer påverkades av nedsmutsningen i stallarna och även av skymningsreläets funktion. Grisarna orsakade en påtaglig mängd damm och smuts på sensorernas kupoler. Efter rengöring ansamlades damm och smuts på sensorerna tills de blev rengjorda av personalen igen. Sensorerna rengjordes dagligen med dammvippa och torkades av med våt trasa en gång per vecka.

Nedsmutningsfaktorns beräknades genom att använda 2014-02-12 som referensdatum, då sensorerna blivit ordentligt rengjorda. För övriga dagar valdes en tidpunkt som motsvarade de dagsljusnivåer som gällde den 12 februari kl. 09.18. Vid detta tillfälle bestämdes ljusförhållandena av att belysningen var på, samt att dagsljusnivåerna utomhus var låga (8 081 lux), tabell 4. Liknande tillfällen valdes sedan ut för de dagar som nedsmutningsnivån skulle beräknas för, där beräkningen utfördes enligt följande formel:

$$SSF_{dag\ x} = \frac{E_{referens}}{E_{dag\ x}}$$

$SSF_{dag\ x}$ är nedsmutningsgraden en bestämd dag

$E_{referens}$ är den avlästa ljusstyrkan från sensorn vid referenstidpunkten (2014-02-12, kl 09:18, med tillslagen belysning och dagsljus utomhus 8 018 lux)

$E_{dag\ x}$ är den avlästa ljusstyrkan från sensorn den valda dagen vid ett tillfälle då belysningen var tillslagen och dagsljuset utomhus var ca 8 018 lux.

Tabell 4. Nedsmutningsfaktorn (SSF) för ljussensorerna per jämförelsetillfälle.

Namn	Datum	Sensor ¹ v1		Sensor v2		Sensor s1		Sensor s2	
		E(lux)	SSF	E(lux)	SSF	E(lux)	SSF	E(lux)	SSF
OC1 ²	11 Feb	620.5	-	346.5	-	340.0	-	97.3	-
OC2	19 Feb	514.8	1.21	301.5	1.15	277.4	1.23	85.9	1.13
OC3	03 Feb	439.9	1.41	224.2	1.55	232.6	1.46	70.2	1.39
OC4	21 Jan	490.2	1.27	306.9	1.13	280.4	1.21	96.8	1.01
OC5	01 Jan	526.2	1.20	293.1	1.18	272.9	1.25	93.7	1.04
CL1	04 Feb	433.6	1.43	224.2	1.55	232.6	1.46	70.2	1.39
CL2, 3	10 Feb	442.4	1.40	270.2	1.28	247.7	1.37	76.1	1.28
CL4, 5	25 Feb	432.2	1.44	230.0	1.51	200.2	1.70	92.1	1.06
CL6	12 Mar	440.3	1.41	210.1	1.65	218.0	1.56	60.2	1.62

¹⁾ För definition sensor, se figur 3. ²⁾ Referensvärde rena sensorer.

Det eftersträvade tröskelvärde om 40 lux kan växla på grund av onoggrannheten i skymningsreläets kalibrering, tröskelvärdets inställning, samt variationen i dagsljus i tid och rum.

Endast dagsljus från de ljusstunnlarna som var tillräckligt nära varje sensor för att ge ett betydande bidrag togs med i beräkningen, dvs. ljusstunnel 1 och 2 för sensor s1 respektive v1 och ljusstunnel 2, 3 och 4 för sensor v2 respektive s2. De simulerade värdena beräknades för var och en av ljusstunnlarna individuellt och sedan summerades de för var sensor. Dagsljusbidrag från de ljusstunnlar som var långt ifrån en sensor togs ej med.

Öppningar hos den virtuella modellen placerades över kollektorenheten för var ljusstunnel. Detta fungerade bra för Velux kollektor. Däremot användes en kombination av tillvägagångssätt för Solatube för att minska negativa sidoeffekter, som att förlora en del av instrålningen från himmeln eller förlängd simuleringstid.

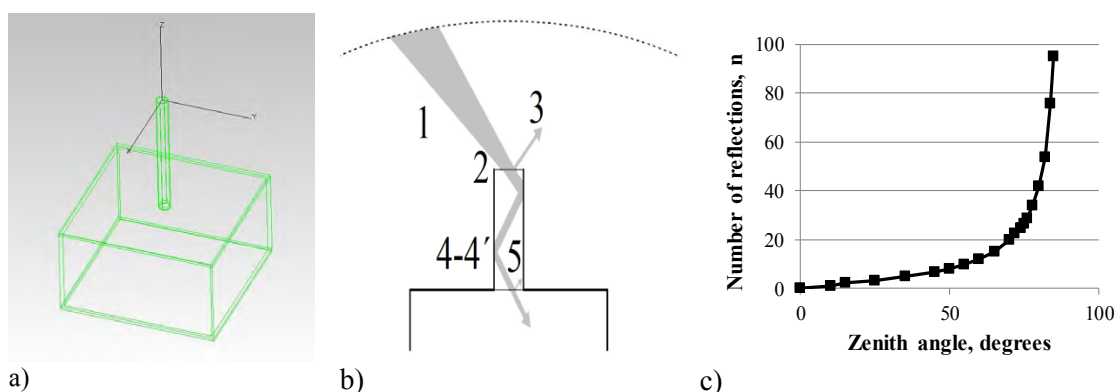
Generella modeller över himmeln för klart väder och molnig himmel (Iwaga all-väders modeller) användes för att simulera ljusfördelning från himmeln. Skillnader i GHI mellan verklig och simulerad himmel justerades genom en korrektionfaktor enligt följande formel:

$$GHI_{factor} = \frac{GHI_{measured}}{GHI_{simulated}}$$

Den uppmätta GHI erhöles från ljussensorn som var placerad utomhus, medan den generella ljusfördelningen från himmeln valdes utifrån hur nära ljusfördelningen förhöll sig till ett index för graden av klar himmel, $K_t = 1$ respektive 0, enligt uppgifter från Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institutet (SMHI) för Lund.

2.7 Parametrisk studie

En parametrisk studie utfördes också för att undersöka inverkan från vissa nyckelparametrar för ljusstunnlarnas utförande och generella prestanda, genom användande av samma simuleringsverktyg som förklarats ovan. Utgångspunkten var en skalenlig rumsmo- del, grundfallet, med en ljusstunnel som dess enda ljuskälla (figur 13a och tabell 5).



Figur 13-a) Grundfallets TracePro® model. b) faktorer som påverkar ljusutbytet från ljusstunneln, se tabell 5. c) antalet reflektioner i en ljusstunnel (bredd-längd förhållande 1/11,25) beroende av zenitvinkeln. Zenitvinkeln = 90 – solhöjden (Kómar & Darula, 2012).

Simulering utfördes i nio varianter, dvs. vid tre olika tidpunkter (08.00, 10.00 and 12.00) vid vårdagjämning och vinter- respektive sommarsolståndet (21 december, 21 mars och 21 juni).

Tabell 5. Bestämda egenskaper för grundfallet i parametriska studien.

Rumsegenskaper	Mått
Rumslängd, bredd, höjd, m	5, 5, 3
Diffuser ljustransmittans, %	92
Diffuseregenskaper (TracePro bibliotek)	MT # 110 000
Kollektor ljustransmittans, %	92
Tak, vägg och golv ljusreflektans, %	80, 60, 45

Sex parametrar varierades och effekten av denna variation analyserades och jämfördes med grundfallet i förhållande till ljusförlustfaktorn (LLF), ljusmängd vid diffusorns lägre yta eller ljusfördelningen på golvnivå i rummet, se tabell 6. Ljusförlustfaktorn beräknades som kvoten mellan den ljusmängden som lämnar diffusorn och det infallande ljuset på kollektorn.

Tabell 6. Parameter som varierades, klasser och påverkande faktorer.

Varierad parameter	Grundfall värde	Varianter	Påverkande faktorer (klart väder) (molnigt)		Kategori
Plats (latitud)	Lund (56°N)	Helsingfors (60°N) Frankfurt (50°N) Bordeaux (45°N) Barcelona (41°N) Malaga (37°N)	1, 2, 3, 4, 5	1	solhöjd
Tunnel längd, m	4,5	3 6	2,4	2,4	ljustunnel bredd/höjd förhållande
Tunnel diameter, mm	350	200 500	2,4	2,4	
Total tunnel reflektans, %	98	99,7 96,3	4'	4'	ljustunnel reflektans
Spec. refl. + diff. refl., %	92+6	98+0 86+12	4, 4', 5	4, 4', 5	
Takvinkel riktning	horisontell	30° syd 30° öst 30° väst 30° norr	2	2	taknock

- 1) Mängd ljus som buffras/absorberas av atmosfären: beroende på klart väder och solposition.
- 2) Mängd ljus som når kollektor: beror på storlek, form, placering och orientering av kollektor.
- 3) Mängd ljus som går genom kollektor: beror på optiska egenskaper hos kollektorn och dess position i relation till de infallande ljusstrålarna.
- 4) Antal studsar i ljustunneln: beror på riktningen hos de infallande ljusstrålarna (klart väder och solposition), på bredd/längd förhållande hos tunnel, på optiska egenskaper hos tunnel, på geometri hos tunnel och på ljusböjande egenskaper hos kollektor (om några). Fig. 13c visar hur antalet studsar i en given tunnel ökar exponentiellt då solen närmar sig horisonten.
- 4') Mängden ljus som förloras i varje studs: direkt länkad till reflektansen hos ljustunneln.
- 5) Mängd ljus som går igenom diffuser: beroende på de optiska egenskaperna hos diffuser, de optiska egenskaperna och geometrin hos ljustunneln, de omriktande egenskaperna hos kollektorn (om någon) och riktningen hos infallande dagsljus.

3 RESULTAT

3.1 Utvärdering av simuleringsmetoden

Den relativa skillnaden mellan simulerad och uppmätt ljusinstrålning som erhöles under klart respektive molnigt väder visas i tabell 7.

Tabell 7. Ljusinstrålningens relativa avvikelse vid simulering i TracePro jämfört med uppmätta ljusinstrålningsvärden (OC = molnigt och CL = klart väder).

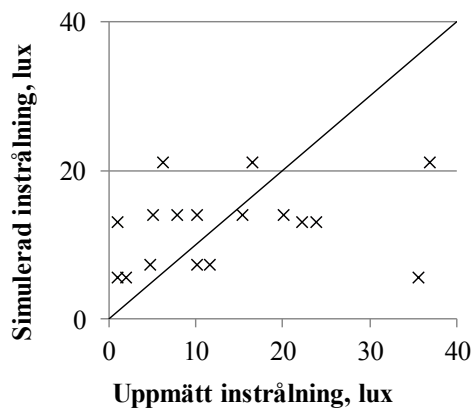
Tillfaller	Datum	Tid	Relativ avvikelse, %			
			Sensor ¹ v1	Sensor v2	Sensor ² s1	Sensor s2
OC1	11 Feb	14.00	19.62	-29.77	-9.32	-2.83
OC2	19 Feb	16.00	-17.62	-16.22	2.58	11.06
OC3	03 Feb	15.00	6.21	-21.19	21.67	16.00
OC4	21 Jan	10.00	4.56	-18.32	-18.84	-6.33
OC5	01 Jan	12.00	11.15	-17.27	5.46	-8.59
CL1	04 Feb	12.00	29.78	-12.97	11.47	-43.14
CL2	10 Feb	15.30	4.55	-14.49	36.10	-12.52
CL3	10 Feb	13.00	35.66	24.22	21.06	-20.37
CL4	25 Feb	14.12	49.69	-4.44	16.68	-3.73
CL5	25 Feb	17.00	-32.98	-16.50	8.35	-36.47
CL6	12 Mar	10.48	39.14	23.10	39.56	-28.60

1) Velux sensor. 2) Solatube sensor.

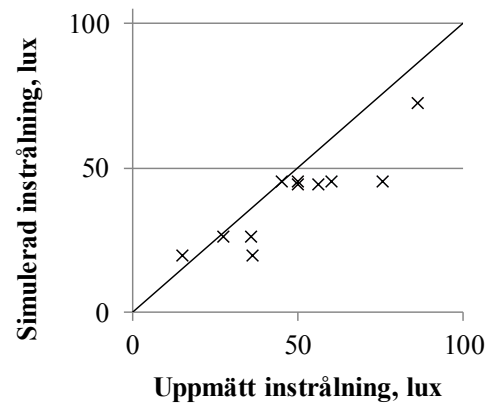
I allmänhet erhöles simuleringsarna vid molnigt väder bättre resultat jämfört med de utförda vid klart väder. För simuleringsarna vid molnigt väder uppgick skillnaderna mellan värdena till mindre än 30 % vid samtliga simuleringsfall, mindre än 20 % vid 85 % av simuleringsfallen och mindre än 10 % vid 40 % av fallen. Dessa skillnader var lägre än vid fallen med klart väder då skillnaderna mellan värdena uppgick till mindre än 30 % vid 67 % av simuleringsfallen, mindre än 20 % vid 42 % av simuleringsfallen och mindre än 10 % vid 17 % av fallen, vilket var ett oväntat resultat.

En grafisk återgivning av mätvärden kontra simulerade värden för molniga och klart väderförhållanden visas i figurerna 13-16. De uppmätta värdenas intervall var högre vid molniga förhållanden jämfört med vid klart väder förhållanden. Intervallet var också högre för ljussensorer placerade mellan ljusstunnlar (v1 och s1) än för sensorer placerade precis under ljusstunnlarna (v2 och s2), vilket var ett väntat resultat. Trenden tycks emellertid vara att mätresultaten motsvarade simuleringsresultaten vid molniga väderförhållanden för samtliga sensorer.

För klart väderförhållanden, fanns det en trend att överskatta värden vid högre instrålning hos sensorerna v1 och s1 (figur 15a respektive 16a). För sensor s2 i figur 16b tycks det finnas en omvänd trend (progressiv underskattning). Trenden för simuleringen av sensor v2 i figur 15b tycks vara att den i huvudsak följer de uppmätta värdena.

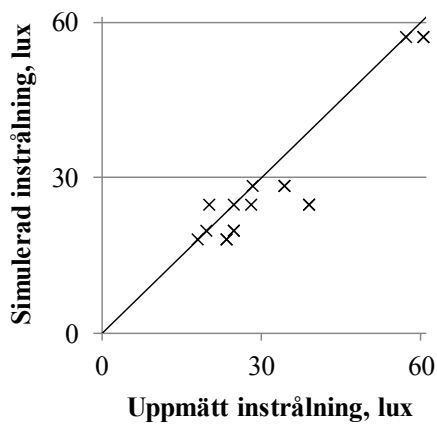


a)

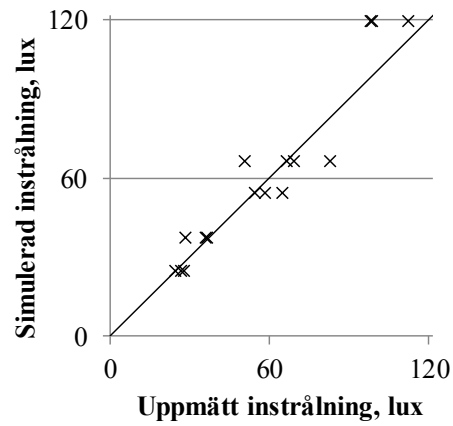


b)

Figur 13. Jämförelse mellan uppmätt och simulerad (TracePro) instrålning för a) sensor v1 och för b) v2 vid molniga väderförhållanden.

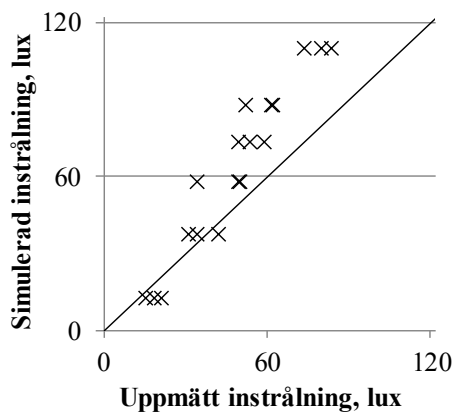


a)

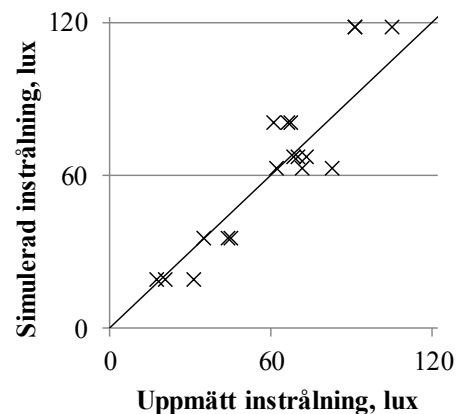


b)

Figur 14. Jämförelse mellan uppmätt och simulerad (TracePro) instrålning för a) sensor s1 och för b) s2 vid molniga väderförhållanden.

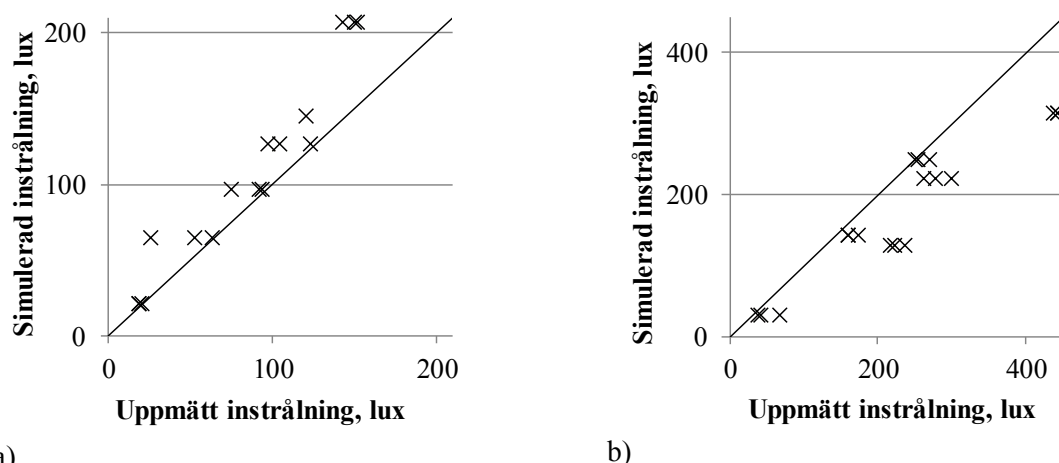


a)



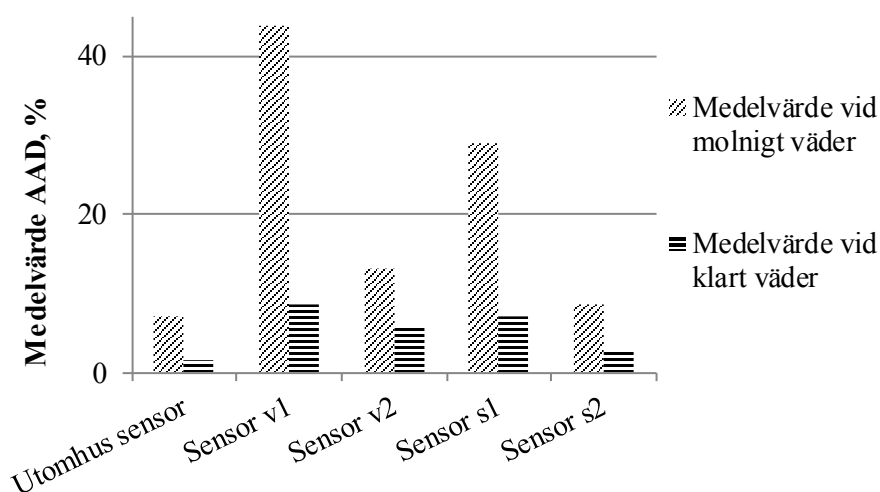
b)

Figur 15. Jämförelse mellan uppmätt och simulerad (TracePro) instrålning för a) sensor v1 och för b) v2 vid klart väder förhållanden och solhöjdsområde mellan 3-28°.



Figur 16. Jämförelse mellan uppmätt och simulerad (TracePro) instrålning för a) sensor s1 och för b) s2 vid klart väder förhållanden och solhöjdsområde mellan 3-28°.

Den absoluta medelavvikelsen (AAD) visas i figur 17. Den bekräftar att instrålningsvärdena är mer stabila för klart väder än för molniga väderförhållanden, samt för sensorerna v2 och s2 placerade under ljusstunnlarna, än för sensorerna v1 och s1 som var placerade mellan ljusstunnlarna. Det bör noteras att detta inte motsäger resultaten från tabell 7, vilken visade lägre avvikelse i medeltal för värden vid molnigt väder.

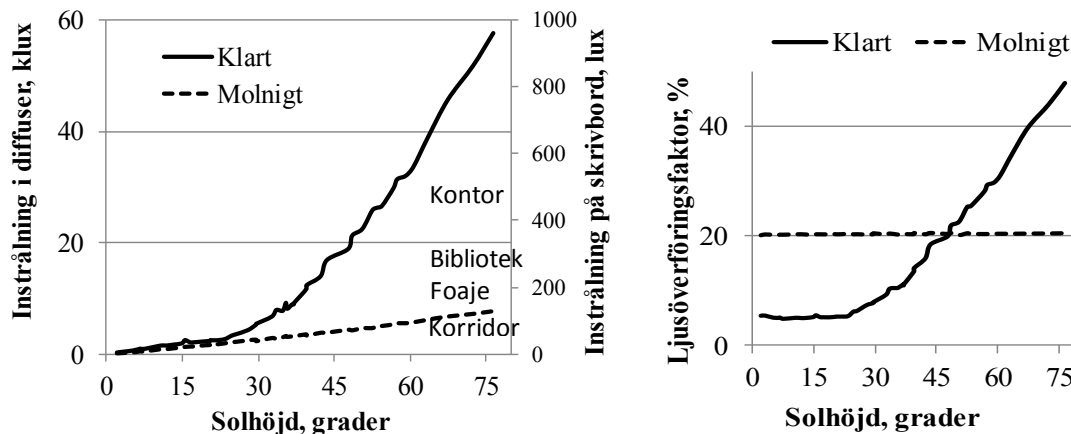


Figur 17. Absoluta medelavvikelsen per sensor i medeltal för de 5 molniga och 4-6 klart väder fallen (fallen CL2 and CL5 uteslöts från medelvärdet).

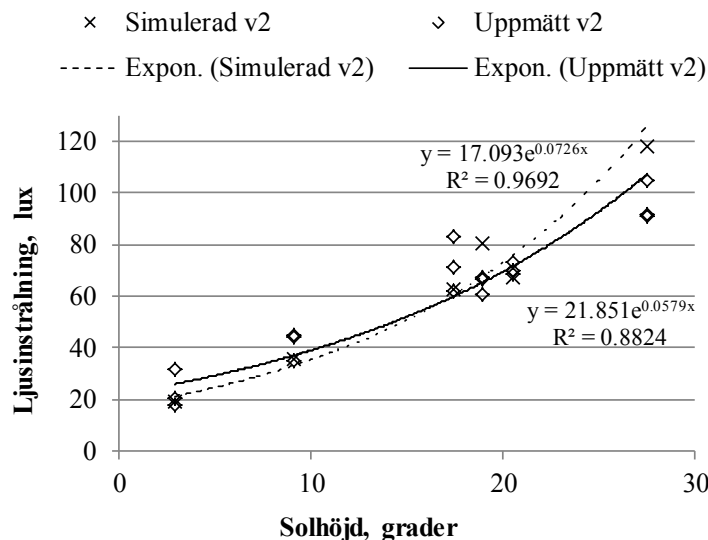
3.2 Parametrisk studie

Den absoluta ljusinstrålningen är vanligtvis angiven som infallande ljusinstrålning vid skrivbordshöjd eller mot golvet. I det här fallet ansågs det mer ändamålsenligt att uttrycka det som den ljusinstrålning som lämnar diffusern, då ljusfördelningen från ljusstunnlarnas diffuser kan variera mycket vid övergång från molnigt till klart väder. Av den anledningen ansågs beräkningen av hur mycket ljus som lämnar diffusern samt dess

jämförelse med den instrålade mängden ljus som föll på kollektorn som ett bättre mått på ljustunnelns prestanda vid molnigt och klart väder förhållanden.



a) b)
 Figur 18a Teoretisk ljusinstrålning som lämnar diffusern som funktion av solhöjden hos referensljustunneln. b) Teoretisk ljusöverföringsfaktor (LTF) som funktion av solhöjden hos referensljustunneln. Simuleringen i TracePro medförde en viss överskattning av solljuset i båda diagrammen.

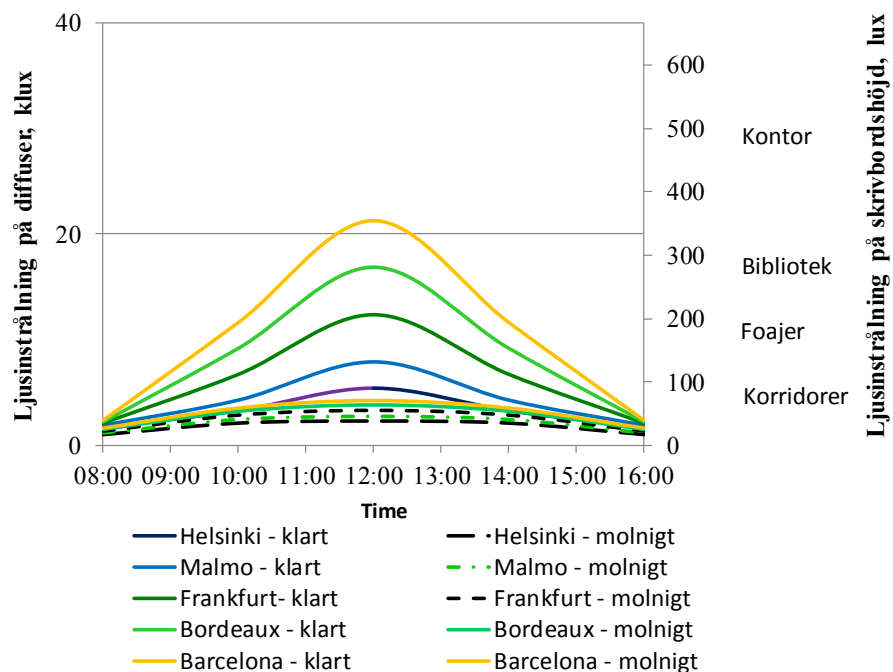


Figur 19. Trendlinjer för uppmätta och simulerad ljusinstrålning på sensor v2 som funktion av solhöjden.

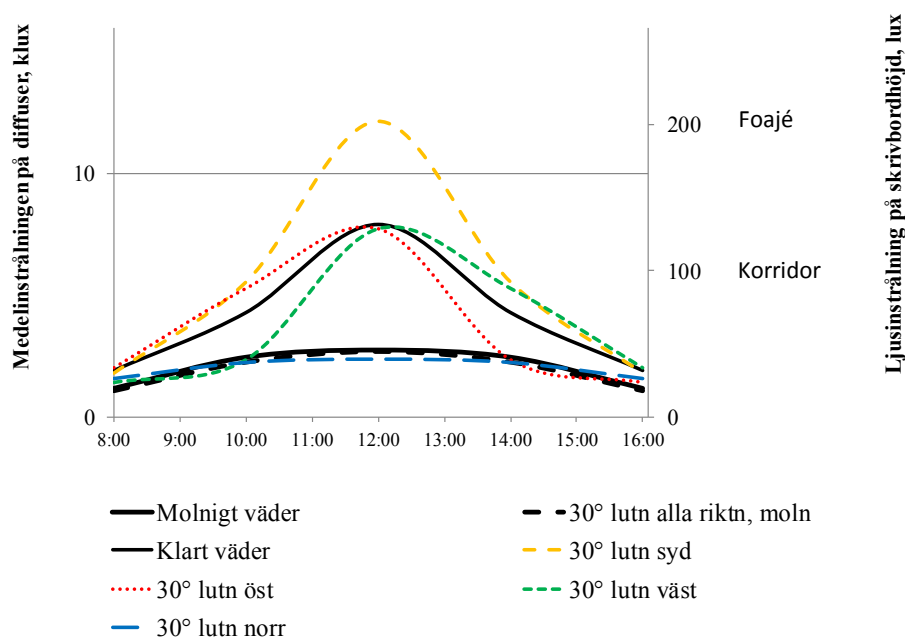
Figur 18a visar ljusinstrålningen vid diffusern som funktion av solhöjden för både klart och molniga väderförhållanden. Ljusinstrålningen ökar mycket snabbare för klart väder än för molniga väderförhållanden.

Metoden framåt strålsparning överskattar ljusutbytet från högre solhöjder vid klart väder. Figur 19 framställdes för att ge ett perspektiv på ovanstående resultat i figur 18a. Där jämförs trenderna hos de simulerade och uppmätta värdena vid ökad solhöjd och klart väder för sensor v2. Trenden för de simulerade värdena är att de ökar fortare än de uppmätta värdena. Sensor v2 valdes för jämförelsen då den är placerad under en ljustunnel med platt kollektor.

Figur 18b visar ljusöverföringsfaktorn (LTF) i relation till solhöjden både för klart och molniga väderförhållanden. LTF ökar linjärt från 35° solhöjd vid klart väder. Å andra sidan påverkas inte LTF av solhöjden vid molnigt väder. Latitudens inverkan på ljusstunnelns prestanda vid olika geografisk placering liksom utgående ljusstrålning från diffusern vid olika taklutning vid vår- och höstdagjämning i Lund visas i figur 20, 21.



Figur 20. Utgående ljusinstrålning från diffusern hos olika europeiska städer vid den 21 mars/september, simulerat med TracePro.



Figur 21. Utgående ljusinstrålning från diffusern vid olika taklutning den 21 mars/september i Lund.

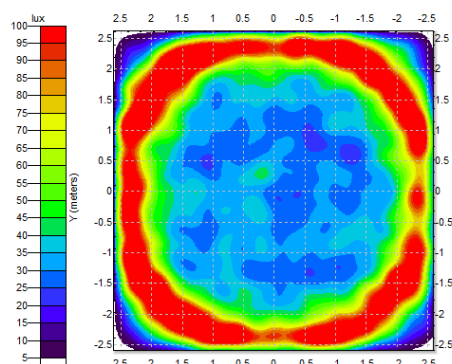
Ytterligare resultat från den parametriska undersökningen står att finna i Pacheco Diéguez' (2014).

4 DISKUSSION

4.1 Variationen i mätvärden

Variationen i mätvärden vid klart och molnigt väder fordrar en separat diskussion. Nivån hos ljusinstrålningen och ljusfördelningen vid molnigt väder beror i hög grad på sammansättningen av molnlagren, vilket gör avläsningarna mer varierande och svårare att förutsäga än vid fallen med klart väder. Enligt figur 17 var variationen i ljusinstrålning 2 till 5 gånger större vid molniga förhållanden än vid klart väder. Dessa fluktuationer mellan mätningarna illustreras också genom den stora spridningen hos mätpunkterna i figurerna 13-16. Trots den stora variationen följer mätvärdenas medelvärden samma trend som de simulerade värdena. Genom att använda bilder med hög upplösning (HDR) från verklig simulerad himmel (Inanici, 2010), skulle osäkerheten orsakad av ljusfördelningen från himmeln kunna undvikas men detta provades ej i den nuvarande studien.

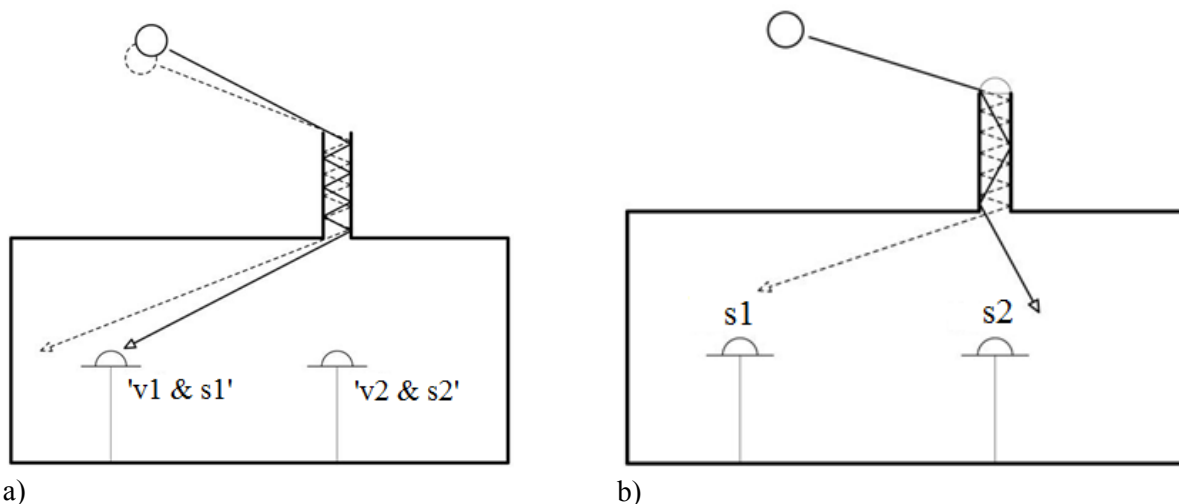
Sensors placering relativt ljustunneln visas i figur 17. Variationen hos dagsljusnivån som funktion av sensorposition påverkas av typen av himmel. Vid molniga väderförhållanden med låg ljusinstrålning, arbetar sensorerna v1 och s1 (5-30 lux) nära sin angivna noggrannhetsnivå. Detta kan innebära att felet hos sensorerna vid låg ljusinstrålning skulle kunna bli större. Men registrerade mätvärden tycks ha en linjär återgivning vid ökad ljusinstrålning (von Wachenfelt, 2015).



Figur 22. Exempel på ljusinstrålningens fördelning på golvet, producerat av direkt solljus genom en ljustunnel.

Vid klart väder kan skillnaden mellan sensorerna 'v1, s1' och 'v2, s2' härledas till formen hos ljusstrålen. Figur 22 visar en ring av ljus på golvet producerad av solljuset överfört via ljustunneln. Storleken hos denna ring är väldigt känslig för variationer i solens plats på himlen, vilket visas i figur 23a. Bristande precision i modellen eller i simuleringen av solpositionen skulle kunna ha orsakat en annat ringmönster. Detta bedömdes vara en huvudorsak till högre ljusvariation hos sensorerna 'v1 och s1' vid klart väder förhållande.

Detta visar vikten av att placera sensorerna under ljustunnlarnas diffuser för att minska variationen i sensorernas avläsning av ljusinstrålning.



a) Diagram som visar hur en liten variation hos solvinkeln kan ha en betydelsefull inverkan på hur ljuset når (diffuser ringmönster) sensorn. b) Diagram som visar hur bristen på kollektordomens ljusböjande egenskaper orsakar överskattning hos sensorn 's2' och underskattning hos sensorn 's1'.

4.2 Överensstämmelse mellan uppmätt och simulerade värden

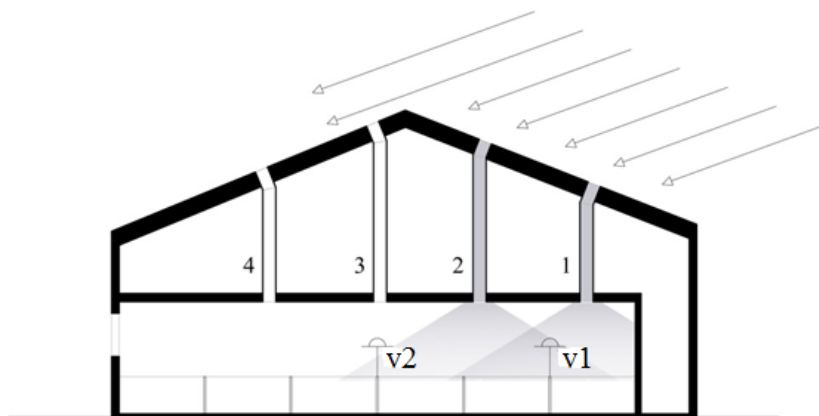
Avvikelsen mellan simulerad och uppmätta värden var lägre vid molnigt än vid klart väder. Med en totalt fel om $\pm 20\%$, kan detta relativa fel betraktas som acceptabelt vid tidiga steg i projekteringen för att erhålla en förutsägbar prestationsförmåga. Vid molniga väderförhållanden, kan de simulerade värdena avvika mindre än 20 % jämfört med medelvärdet hos mätvärdena i 85 % av fallen och i 42 % av fallen vid klart väder.

Vid klart väder, ökar felen då ljusinstrålningen och solhöjden ökar för tre av fyra sensorer. Simuleringarna motsvarar mätvärdena för en sensor (v2) och överskattar dem hos den andra (v1) för stall 1, Velux ljusstunnlar. I stall 2, Solatubes ljusstunnlar överskattar en sensor (s1) mätvärdena av ljusinstrålning medan den andra underskattar dem (s2).

I stall 1 blev ljusstunnelns samtliga beståndsdelar felfritt karakteriserade inklusive BDSF fil av diffuser, vilken tillhandahölls av tillverkaren. Överskattningen av värdena för ljusinstrålning hos sensor v1 var troligen mest ett felaktigt återgivande av solljuset. Sensor v1 träffades av direkt solljus medan sensor v2 (godkänd simulering) träffades endast av strålar från himmeln (indirekt ljus).

Figur 24 visar hur direkt solljus hindras avnocken från att träffa ljusstunnel tre, som är placerad norr om taknocken. Sensor v2 får sitt ljus genom denna ljusstunnel. Sensor v1 (tendens till överskattning) är placerad mellan ljusstunnlarna ett och två, och erhåller direkt solljus. Detta leder till slutsatsen att ljusinstrålning av direkt solljus överskattas och ljusinstrålning från himmelen simulerades på ett riktigt sätt. Genom användning av HDR bilder skulle detta problem kunna lösas enligt Stumpf et al. (2004).

I stall 2, kan den motsatta trenden hos sensorerna (över- och underskattning) förklaras genom avsaknaden av goniofotometrisk mätning av Solatubes kollektorkupol. Denna beståndsdel av ljusstunneln är ett optiskt omriktningssystem som fordrar den här typen av information för att kunna ta hänsyn till dess ljusböjande egenskaper.



Figur 24. Sensor v1 nås av direkt solljus, medan sensor v2 ej nås.

Figur 23b visar hur solstrålarna riktas om in i ljustunneln vid lägre solvinklar och når ytan runt sensorn 's1'. De simulerade strålarna (streckmarkerad linje) är inte böjda i kollektorn och når in i rummet med en mindre vinkel, vilket ger en överskattning av ljusinstrålningen hos sensor 's2' och en underskattning hos sensor 's1'. Teoretiskt skulle tendensen ha varit den samma som hos sensor v2 i stall 1 (överskattning pga. solljus) om det hade varit möjligt att simulera kollektordomens ljusböjande egenskaper i simuleringsprogrammet.

Analysen av ljustunnlarna visade ett högre utbyte hos Solatube än hos Velux. Detta beror på många faktorer som: högre ljustunnelreflektans, högre speglande reflektans, högre ljusöverföring hos kollektor och diffuser, innovativ kollektordom etc. Den större skillnaden mellan v2 och s2 är till stor del orsakad av det faktum att Solatubes kollektor på norrsidan var utsatt för direkt solljus i större utsträckning medan Velux kollektor var skuggad av taknocken. Det konstaterades också att Solatubes omriktningssystem i kollektordomen gav en smalare ljusstråle än hos Velux ljustunnlar.

4.3 Parametrisk studie

4.3.1 Solhöjd

Solhöjden är den parameter som har störst inverkan på ljusutbytet från ljustunnlar, speciellt vid klart väder, figur 18. Resultaten från studien visar att simuleringsmetoden överskattar solljus vid klart väder då solhöjden ökar, vilket också framgår av figur 19, där trendlinjerna för uppmätta och simulerade värden visar en likartad exponentiell tillväxt. Enligt figur 18b är procentandelen ljus som passerar ljustunneln (LTF) vid molnigt väder konstant även om solhöjden varierar. Detta visar att den lilla ökning i ljusinstrålning som framgår i figur 18a troligtvis är orsakad av en ökning i GHI (faktor 1 i tabell 6). Detta beror på det faktum att ljusinstrålningen vid molniga väderförhållanden är konstant för samtliga solhöjder.

Skillnaden i ljusutbyte från ljustunnlarna mellan molnigt och klart väder bekräftas av mätresultaten i grisstallarna. Ljushöjden som når sensor s2 under CL4 är 280 % högre än under OC1, och bara 8 % högre för sensor v2. Detta visar hur betydelsefull effekt solljuset har för ljustunnelns prestanda.

Solhöjden är kopplad till latituden och därför är ljustunnlar mer effektiva om de används i södra Europa än i Skandinavien av två skäl, solhöjden och andelen klart väder.

Direkt solljus uppträder omkring 2000 timmar i södra Europa och bara ca 1000 timmar i Skandinavien.

4.3.2 Ljustunnelns bredd/längd förhållande

Ljustunnelns bredd/längd förhållande avgör mängden ljusstudsar i ljustunneln vilket kan påverkas av projektören. En ökning av bredd/längd förhållandet från 0,1 till 0,06 ledde till en ökning av ljusinstrålningen om 11,5 % vid sommarsolståndet kl 12.00 respektive 6 % vid vintersolståndet kl 12.00. En ökning i LTF som funktion av ljustunnelns bredd/längd förhållande är emellertid inte beroende av solhöjden vid molnigt väder. En motsvarande ökning av bredd/längd förhållandet vid molniga förhållanden ger en ökning om 4,5 % i LTF.

4.3.3 Ljusinstrålning från ljustunneln

Den speglade reflektansen har en kraftig inverkan på procentantalet ljus som passerar ljustunneln (LTF). En ökning i LTF om ca 1 % till 3 % kan erhållas för var extra procent ökning i reflektans – den högre ökningen erhålls vid högre solhöjder.

Ljustunnelns LTF ökade med 1,5 till 4 % för var procentsats ökning av speglade reflektans som överförts från diffus reflektans, vilket visar vikten av att förbättra ljustunnelns speglade reflektans för att erhålla högre ljusutbyte från ljustunnlar.

4.3.4 Taklutningens riktning

Taklutningens inverkan på ljustunnelns prestanda under vintersolståndet är försumbar vid en ljusinstrålning om 10 till 30 lux på skrivbordsnivå, vilket är under referensvärdena för korridorer (100 lux), vilket beror på mycket låga solhöjder under 11°. Toppvärdet för ljusinstrålningskurvan vid middagstid ökade med 52 och 32 % i mars respektive juni vid en taklutning om 30° mot söder. Om taklutningen var 30° mot norr minskade ljusinstrålningskurvan vid middagstid med 71 respektive 40 % vid motsvarande tillfällen. Taklutningens inverkan på ljusinstrålningen är störst vid middagstid och minskar morgon- och kvällstid. Vid molnig väder är horisontella tak optimalt för ljustunnlar.

4.4 Förslag till förbättrad ljustunnelsimulering

Några rekommendationer vid simulering av ljustunnlar där metoden framåt strålspårning används anges nedan:

- Den speglade och diffusa reflektansen hos ljustunnlarna behöver anges med hög noggrannhet, då små skillnader kan ge betydande fel.
- Goniofotometriska egenskaper hos samtliga ORS hos ljustunneln behöver beskrivas i detalj i en BSDF fil, speciellt vid simulering vid klart väder. Denna information bör tillhandahållas av tillverkaren. Den goniofotometriska definitionen av diffusern påverkar ljusdistribution och ljusutbyte, medan goniofotometrisk definition av kollektorn också påverkar mängden ljus som passerar genom ljustunneln.
- GHI kan variera betydligt vid molniga väderförhållanden. Genom simulering och uppmätning av GHI utomhus vid aktuellt tillfälle kan en faktor erhållas för att väga resultatet.

Ytterligare mått och steg som kan vara till hjälp för att förbättra simuleringsresultatens noggrannhet är användandet av HDR bilder av simulerad himmel istället för generella all-väders modeller. Denna metod tillåter även simulering under blandade himmels förhållanden, dvs vid olika grad av molniga förhållanden.

Ljusinstrålningsvärdena som skapades av ljustunnlarna varierade betydligt trots korta mätperioder, speciellt vid molniga väderförhållanden. Några åtgärder för att motverka detta är följande:

- Placering av sensorer under ljustunnlarna.
- Öka antalet fortlöpande mätningar per tidsenhet.
- Bortse från mätvärden som är av samma storleksordning som sensorernas mätnoggrannhet.
- Bortse från mätvärden erhållna vid gryning och skymning då de är mycket låga och varierar snabbt i storlek.

6 REFERENSER

- Ashkenazy, T., Einat, H., & Kronfeld-Schor, N. (2009). Effects of bright light treatment on depression- and anxiety-like behaviors of diurnal rodents maintained on a short daylight schedule. *Behavioral Brain Research*, 201(2), 343–346.
- CEC. (2001). Commission Directive 2001/93/EC of 9 November 2001 amending Directive 91/630/EEC: Laying down minimum standards for the protection of pigs. Brussels, Belgium: Commission of the European Communities.
- Dehoff, P. (2002). The impact of changing light on the well-being of people at work. In *Proceedings of Right Light*, 5, 374-351.
- Dutton, S., & Shao, L. (2007). Raytracing simulation for predicting light pipe transmittance. *International Journal of Low Carbon Technologies*, 2(4), 339-358.
- Edmonds, I., Moore, G., Smith, G., & Swift, P. (1995). Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels. *Lighting Research & Technology*, 27, 27–35.
- Gentile, N., Håkansson, H., & Dubois, M-C. (2013). Lighting control systems in individual offices at high latitude: measurements of lighting conditions and electricity savings. In *Proceedings of IECEB'12*, Frankfurt, 2013, vol. 1, pp. 333–344.
- Farrel, A., Norton, B., & Kennedy, D. (2004). *Lightpipe daylight simulation modeling using Radiance backward and forward raytracing methods: A comparison with monitored data for commercial lightpipes in Ireland*. Retrieved March 26, 2014, from Third International Radiance Workshop, École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, Switzerland: <http://www.radiance-online.org/radiance-workshop3>
- Figueiro, G. M. (2002). Daylight and Productivity - A Field Study. *Proceedings of 2002 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. Washington DC: American Council for an Energy-efficient Economy.
- Harteb Puleo, S., & Leslie, R. (1991). Some effects of sequential experience of windows in human response. *Journal of the IES*, 20(1), 91-99.
- IEA (2001) International Energy Agency. (2001). *Monitoring Procedures for the Assessment of Daylighting Performance of Buildings*. A Report of IEA SHC Task 21 / ECBCS Annex 29.
- Igawa N., Koga, Y., Matsuzawa, T. & Nakamura, H. (2004) Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution. *Solar Energy*, 77, 137-157.
- Inanici, M. (2010) Evaluation of High Dynamic Range Image-Based Sky Models in Lighting Simulation, LEUKOS: *The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, 7:2, 69-84.
- Jeppsson, K-H., Nilsson, D., von Wachenfelt, H., & Hörndahl, T. (2014). Dimensionering av belysningsstyrka i djurstallar med programmet Dialux och en kvantitativ jämförelse av ljusmiljön i beteshagar och kostallar. LTJ-rapport 2013:34. Sveriges Lantbruksuniversitet, inst. f Biosystem och Teknologi Alnarp.
- Kjellsson, E. (2002). *Solar heating systems for electricity heated houses*. Report number U02:86. Vattenfall AB.
- Kocifaj, M. (2009). Efficient tubular light guide with two-component glazing with Lambertian diffuser and clear glass. *Applied Energy*, 86, 1031–1036.
- Kohler, C. (2010). *NFRC presentation*. Retrieved January 21, 2014, from Initial summary of round robin tvs measurements for tubular daylighting devices (TDD): www.nfrc.org/documents/ComplexProductVTpresentation_April2010ss.pdf

- Kolås, T. (2013). *Performance of Daylight Redirecting Venetian Blinds for Sidelighted Spaces at High Latitudes, Performance analysed by forward raytracing simulations with the software TracePro*. Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Architecture and Fine Art, Department of Architectural Design, Form and Colour.
- Kómar, L., & Darula, S. (2012). Determination of the light tube efficiency for selected overcast sky types. *Solar Energy Volume 86 (1)*, 157–163.
- Lambda Research Corporation. (2014). *TracePro® User Manual, Release 7.4*.
- Lo Verso, V., Pellegrino, A., & Serra, V. (2011). Light transmission efficiency of daylight guidance systems: An assessment approach based on simulations and measurements in a sun/sky simulator. *Solar Energy*, 85, 2789–2801.
- Nilsson, A. (2012). *Daylighting Systems: Development of Techniques for Optical Characterization and Performance Evaluation*. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology.
- Mardaljevic, J., Heschong, L., & Lee, E. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research & Technology*, 41, 261–283.
- Mohelnikova, J. (2009). Tubular light guide evaluation. *Building and Environment*, 44, 2193–2200.
- Murdoch, J. (1985). *Illumination Engineering – from Edison's lamp to the laser*. Macmillan Pub. Co.
- Pacheco Diéguez, Alejandro. (2014). Light pipes, forward raytracing as a predictive tool and key design parameters. Master thesis in Energy-efficient and Environmental Buildings, Faculty of Engineering, Lund University.
- Robertson, A., Hedges, R., & Rideout, N. (2010). Optimization and design of ducted daylight systems. *Lighting Research & Technology*, 42, 161–181.
- SJV. (2014). Djurskyddsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd. Jordbruksverket. (In Swedish, Swedish Animal Welfare Agency, Swedish Board of Agriculture, SJVFS 2014:31 L100).
- Solatube International, Inc. (n.d.). Retrieved February 10, 2014, from www.solatube.com/commercial/product-catalog/brighten-up-series/index.php
- Stumpfel, J., Tchou, C., Jones, A., Hawkins, T., Wenger, A., Debevec, P. (2004). Direct HDR capture of the sun and sky. Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa, 145–149.
- Swift, P. (2010). Splayed mirror light pipes. *Solar Energy*, 84, 160–165.
- TracePro®. (n.d.). *TracePro® website*. Retrieved March 16, 2014, from <http://www.lambdares.com/tracepro>
- Tregenza, P., & Wilson, M. (2011). *Daylighting: Architecture and Lighting Design*. Routledge.
- Whitted, T. (1979). An improved illumination model for shaded display. Proceedings of the 6:th annual conference on Computer Graphics and Interactive Techniques.
- von Wachenfelt, H., Vakouli, V., Pacheco Diéguez, A., Gentile, N., Dubois, M-C., Jeppsson, K-H. (2015). Kan ny teknik ge mindre elanvändning och mera dagsljus i grisstallar? del 1, dagsljusmätningar från ljustunnlar. LTV-rapport 2015:17. Sveriges Lantbruksuniversitet, inst. Biosystem och Teknologi, Alnarp.
- Zhang, T., & Muneer, T. (2000). Mathematical model for the performance of light-pipes. *Lighting Research and Technology*, 32, 141–46.
- Zhang, X., Muneer, T., & Kubie, J. (2002). A design guide for performance assessment of solar light-pipes. *Lighting Research and Technology*, 34.

APPENDIX 1.

För att erhålla ett mer detaljerat underlag av simuleringmetodiken hänvisas till Alejandro Pacheco Diéguez' Masterarbete vid institutionen för Energi- och Byggnadsdesign, Lunds Universitet, i litteraturlistan ovan.